



TITLE:

# Development of Stability Evaluation Methods for Soil-Masonry Structure Interactive Problems and Application to Historic Structures( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

Hashimoto, Ryota

---

CITATION:

Hashimoto, Ryota. Development of Stability Evaluation Methods for Soil-Masonry Structure Interactive Problems and Application to Historic Structures. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20327>

RIGHT:

許諾条件により本文は2017-10-01に公開

京都大学	博 士 (工 学)	氏名	橋本涼太
論文題目	Development of Stability Evaluation Methods for Soil-Masonry Structure Interactive Problems and Application to Historic Structures（地盤-石積複合構造物の安定性評価手法の開発と歴史的構造物への適用に関する研究）		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、剛体としての石材と連続体としての地盤とを統一的に解析することができる新たな枠組みとして、マニフォールド法（Numerical Manifold Method: NMM）と不連続変形法（Discontinuous Deformation Analysis: DDA）の連成解析法に土の非線形挙動をモデル化して組み込むことによって、地盤に構築された石積構造物の合理的な安定解析法（NMM-DDA 法）を構築し、歴史的構造物の安定性評価に適用したものであり、7 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、世界遺産であるピラミッド、マチュピチュなどに代表される歴史的石積構造物の劣化状況、補修の必要性について述べるとともに、考古学や歴史学では対応できない工学的な視点を持った修復の必要性を説明した。これに基づき地盤と石材の複合構造物であることの難しさとそれに見合った評価手法が不可欠であることを示し、研究の方向性について論じた。</p> <p>第 2 章では、地盤-石積み複合構造物の安定性評価に関する既往研究をレビューし、その必要性和問題点を指摘することにより、本研究の位置づけを説明した。カンボジア・アンコール遺跡の事例を取り上げ、経年劣化の現状と変状モードについて詳細に示すとともに、各構造物がどのような技術で補修されているのかについて解説した。さらに、石積構造物の変状解析に用いられている有限要素法の限界を示し、本研究で用いる NNM-DDA 法の有意性を対比的に説明することにより、研究の方向性と論文の章立てについて述べた。</p> <p>第 3 章では、地盤と石積の相互作用を表現するために、連続体モデルと離散体モデルの連成させる解析法を提案した。弾性材料を対象としたマニフォールド法（Numerical Manifold Method: NMM）と石積のような離散体に対する不連続変形法（Discontinuous Deformation Analysis: DDA）を連成させた解析法（NMM-DDA）において、弾性体のみを対象としポテンシャルエネルギー最小化原理に基づき定式化されていた同手法を、重み付き残差法で再定式化後、増分形の構成則を搭載した弾塑性解析へと拡張し、土の材料非線形性を考慮可能にすることで地盤と石積構造物の相互作用を適切に考慮した変形解析法を開発した。また、単純に弾塑性問題に展開した場合に起こりうる堆積ロッキングを回避するために、接点ベース均一ひずみ要素を導入し、解の精度を低下させることなく NMM-DDA に応用する方法を提示した。提案手法を用いて片持ち梁の曲げ問題や帯状フーチングの支持力問題を解析し、理論解と比較することによってその妥当性を検証した。</p> <p>第 4 章では、第 3 章で提案した弾塑性 NMM-DDA を基礎地盤の変形によって被害を受けたカンボジア・アンコール遺跡のプラサートスープラ N1 塔の変形解析に適用した。原位置から採取した基壇の土に対する室内力学試験に基づき、過圧密土である基壇のダイレイタンス特性を表現するのに適した下負荷面 Cam-clay モデルを導入し、地盤としての基壇と石積構造であるプラサートスープラ塔を一体として数値解析を実施した。その結果、塔が変状した被害は、地盤の不同沈下による構造物全体の傾斜と、塔を構成する石材の目地の開きによるものであることを示した。これは、現地調査によって得られた知見と調和的であり、提案した解析手法が妥当であることを実証して</p>			

京都大学	博 士 (工 学)	氏名	橋本涼太
<p>いる。また地盤の不同沈下は基壇内部の版築と呼ばれる締固め土内部で発生したせん断によるものであり、これに起因した局所的な荷重集中によって地盤がさらに不均質に圧縮し、変状が徐々に進行したものであることを明らかにした。一連の解析結果により、版築から成る基壇の強度が上部構造であるプラサートスープラ N1 塔の安定性を支配する要因であることが確認され、修復にあたっての力学的根拠を提示した。</p> <p>第 5 章では、石積構造物の修復設計時に石材と版築で構成される基壇部が上部の構造物の重量をどこまで支えられるか、すなわち地盤-石材複合基礎の支持力を定量的に評価するための数値解析による検討を実施した。基壇に用いられる石材の厚さを <math>h</math>、幅を <math>B</math>、石積の石材の積層時のオーバーラップ長を <math>l</math>、石材の段数を <math>n</math> とし、石積基壇の構造特性を石材の縦横比 <math>h/B</math>、石材の幅に対する石材間のオーバーラップ幅 <math>l</math> の比 <math>l/B</math>、石材の段数 <math>n</math> をパラメータとして表現できることを示した。そして、各構造パラメータを変化させ、基壇構造に対する載荷シミュレーションを行い、各構造パラメータが石積基壇の極限支持力と破壊メカニズムに及ぼす影響を検討した。その結果、以下の知見を得た。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 石積基壇は版築内部のすべり面と石材間のすべりが接続することで破壊し、極限支持力を迎える</li> <li>・ 上部構造から石材に伝達された荷重は、一部を地盤が「残りを下段の石材が受け持つ形で伝達されるが、下段の石材への荷重分配率が石材間のすべり破壊の発生に大きく影響する。</li> <li>・ 上下段の石材のオーバーラップ幅 <math>l</math> が大きいと石材への荷重分配率が大きくなり、石材間の摩擦強度が増加するため、極限荷重は増大する。</li> <li>・ 石材の縦横比 <math>h/B</math> が変化すると載荷点から地盤内の滑り円の半径と中心点までの距離の変化が複合的に作用し極限荷重が変化する。</li> </ul> <p>以上より、石積複合構造物としての基壇の崩壊機構を提案解析手法によって明らかにした。</p> <p>第 6 章では、現実の修復過程における研究成果の利活用と設計を念頭に置き、石積基壇構造物の極限支持力簡易算定法を提案した。具体的には、前章で得られた石積基壇の崩壊機構より、上部構造物からの荷重、地盤内部に生じる円弧状のすべり面に沿った土のせん断抵抗、すべり面に接続する石材底面の反力および摩擦力を仮定し、石材間の荷重分担率を考慮したすべり円の中心点まわりのモーメントの釣合式から誘導される支持力式を用いて、基壇の極限支持力を求めるものである。提案した簡易算定法は現実的な構造条件下においては NNM-DDA によって計算された基壇の地盤内応力状態、極限支持力ともに高い精度で一致することがわかり、その妥当性を実証した。また、複雑な数値解析を経ないこの簡易算定法は、修復現場において非常にシンプルかつ明確な手順で極限支持力を予測でき、地盤の強度のほか構造条件や石材間の摩擦特性をも考慮可能であることから、石積複合構造物の合理的な修復に貢献できる有効な手法であることを示した。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約した。</p>			

## (論文審査の結果の要旨)

本論文は、石積構造物を対象として、剛体としての石材と連続体としての地盤とを統一的に解析することができる新たな数値解析手法を構築、提案し、基壇上に建設された石積構造物の変状評価に適用するとともに、理論解との比較を通じてその妥当性について研究した成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 地盤と石積の相互作用を統一的に解析するために、連続体を取扱うマニフォールド法 (Numerical Manifold Method: NMM) と石積のような離散体に対する不連続変形法 (Discontinuous Deformation Analysis: DDA) を連成させた解析法である NMM-DDA 法に土の弾塑性構成則を組み込むことにより、土の材料非線形性を考慮可能にすることで地盤と石積構造物の相互作用を適切に考慮した変形解析法を開発した。また開発した解析手法によって理論解を有する問題を解くことにより、その妥当性を検証した。
2. 開発した解析手法 (NNM-DDA) を用いてカンボジア・アンコール遺跡のプラサートスープラ N1 塔の変状解析を行った。解析結果は、地盤の不同沈下による構造物全体の傾斜と、塔を構成する石材の目地の開きという現地で発生した挙動を的確に表現することができ、NNM-DDA が基礎地盤としての基壇上に構築された石塔の連続体-離散体の相互作用安定問題を合理的かつ定量的に評価しうる解析手法であることを示した。
3. 石積構造物の修復設計時における、地盤-石材複合基礎の支持力を定量的に評価するために開発した NNM-DDA による数値解析に基づいて検討し、石積基壇の構造特性を石材の縦横比  $h/B$ 、石材の幅に対する石材間のオーバーラップ幅  $l$  の比  $l/B$ 、石材の段数  $n$  をパラメータとして表現できることを示した。これにより、NNM-DDA を適用することによって連続体と離散体から成る複合地盤の支持力特性を合理的に評価しうることを示し、その有意性を明らかにした。
4. 修復の現場における設計を考えると、精緻ではあるが複雑な数値解析を必要としない合理的な簡易支持力算定が求められるため、NNM-DDA による解析結果をベースとした石材間の荷重分担率を考慮した支持力式を基礎とする簡易極限支持力算定式を提案した。提案手法はシンプルかつ明確な手順で地盤-石材複合地盤の支持力を算定でき同時に NNM-DDA と同等の結果を与えることを明らかにすることにより、石積構造物の合理的な修復に適用可能な有用な手法であることを示した。

以上のとおり、本論文は、連続体である地盤と離散体である石材から成る複合地盤構造物の挙動を統一的に評価することができる、新たな数値解析法を構築し、学問的・技術的合理性を持った手法を提案した先進的なものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 29 年 1 月 23 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。